

- фильтрующие устройства;
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- персональная ЭВМ.

Сигнал, издаваемый объектом диагностирования, фиксируется датчиками (вибрационной и акустической составляющими). Затем определяются наиболее информативные компоненты сигнала, которые выделяются фильтрующими устройствами. После этого аналоговый сигнал (электрический) преобразуется в цифровой код посредством АЦП и передается в общий банк данных ЭВМ, где производится обработка результатов.

Программа экспериментальных работ включает:

- Исследование рабочих клапанов одного типа;
- Исследование «дефектных» клапанов (дефекты вносятся в конструкцию клапана искусственно на основании статистических данных);
- Составление словаря диагностических признаков;
- Сбор диагностической информации в единый банк данных;
- Исследования полученных данных, их упорядочивание, построение диаграмм отказов, исследо-

вание вероятности отказов для конкретного типа клапанов.

Следует отметить, что разработанная методика может найти место и в других отраслях народного хозяйства — энергетика, нефтегазовая промышленность, общее машиностроение и др.

1. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. — М., 1987.
2. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М., 1978.

#### DEVELOPMENT OF DIAGNOSING CONCEPTION OF SOURCE TECHNICAL AVAILABILITY OF AUTOMATED ELEMENTS OF PNEUMOHYDRAULIC LAUNCH VEHICLE SYSTEMS

A. N. Ponomarev, A. V. Sichevov

The actual problems of the operational reliability improvement of the space launch vehicles are analyzed. The modern test methods, the vibroacoustical diagnosing methods of the engines and mechanisms diagnostics are considered. A composition of bench equipment for the test of the automation elements of pneumohydraulic launch vehicle systems is introduced.

УДК 536.423.1

## ВЫЯСНЕНИЕ ПРИЧИН АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ЖРД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ МАШИННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

© Л. В. Пронь, С. А. Самохвалов

Дніпропетровський національний університет

Зроблено спробу статистичного визначення типу несправності, що виникла внаслідок аварійної ситуації, на основі локалізації несправності за допомогою вектора спеціально підібраних параметрів.

Назначение системы контроля работоспособности двигателя состоит в принятии решения о состоянии всей ДУ в течение определенного промежутка времени на основе совокупности ряда признаков. Промежуток времени от момента возникновения первичной неисправности  $\tau_0$  до состояния аварии  $\tau_a$  будем называть временем экспозиции  $\tau_{\alpha} = \tau_a - \tau_0$ .

Для создания систем контроля необходимо определение количественных состояний  $(\tau_{\alpha}, \alpha)$ . ( $\alpha$  — коэффициент охвата аварийных состояний, численно равный вероятности прогнозируемых отказов). Пусть  $P_j$  — вероятность того, что  $j$ -е аварийное состояние контролируется системой, тогда

$$P_j = P(\tau_{\alpha j} - \tau_{c j}) > 0.$$

Вероятность того, что все аварийные состояния контролируются в предположении их статистической независимости, равна

$$P_k = \prod_{j=1}^m P_j,$$

где  $m$  — количество аварийных состояний.

Так как контролируемые и неконтролируемые аварийные состояния при заданном  $E_c$  являются событиями независимыми, то

$$P_k + P_{нк} = 1,$$

где

$$P_{нк} = \prod_{j=1}^m P(\tau_{\alpha j} - \tau_{c j}) \leq 0$$

— вероятность неконтролируемых аварийных состояний.

Коэффициент охвата аварийных состояний численно равен вероятности прогнозируемых отказов, т. е.  $\alpha = P_k$ .

Исходными данными для  $\alpha$  есть  $\tau_0$ ,  $\tau_c$ ,  $n_k$  — количество прогнозируемых и  $n$  — общее количество аварийных состояний, тогда  $\alpha$  — частота прогнозируемых аварийных состояний  $\bar{\alpha} = n_k/n$ . Теоретически с достаточной точностью найти  $\tau_0$  и  $\alpha$  не представляется возможным. Поэтому единственным путем их определения является статистическая обработка результатов испытаний. Так как первичные неисправности и соответствующие им аварийные состояния мало зависят от условий испытаний и размерности двигателя, а в основном зависят от его схемы и степени отработанности, то для полученных статистических данных можно использовать все испытания двигателей, как в стендовых, так и в летных условиях, а также результаты теоретических исследований динамики развития аварийных ситуаций.

Необходимо заметить, что параметры рабочего процесса коррелированы, поэтому однозначное определение состояния двигателя — задача сложная. Для увеличения достоверности прогноза необходимо в характере изменения параметров выявить также признаки, по которым можно было бы отличить одно аварийное состояние от другого. Следовательно, каждому классу состояний должен быть поставлен в соответствие определенный сигнал в виде изменения некоторой совокупности параметров рабочего процесса, отличных от сигналов других состояний. Определение такой совокупности параметров, характеризующих аварийное состояние, является исходным моментом прогнозирования.

Пусть каждое аварийное состояние контролируется совокупностью параметров рабочего процесса. Тогда, рассматривая контролируемые параметры как функции времени, можно решить задачу прогнозирования состояний и предсказать момент наступления отказа, а при возможности и определить (локализовать) место отказа.

Математический аппарат прогнозирования включает элементы численного анализа и теории случайных функций. Пусть контролируемый параметр  $y_i(\tau)$  в области  $0 \rightarrow \tau_n^*$  принимает значения  $y(\tau_0)$ ,  $y(\tau_1)$ , ...,  $y(\tau_n)$ , которые зафиксированы контролирующей аппаратурой.

1. Необходимо по известным значениям  $y(\tau_i)$  контролируемой функции в прошлом ( $\tau_i \in \tau^*$ ) предсказать значения величин  $y(\tau_{n+1}, \dots, \tau_{n+m})$ , где

$\tau_{n+i} \in \tau > \tau^*$ . Это аналитический принцип прогнозирования.

2. Необходимо по известным значениям  $y(\tau_i)$ , причем  $\tau_i \in \tau^*$ , где  $i = 0, 1, \dots, n$ , определить вероятность того, что значения функции  $y(\tau)$  не выйдут за допустимые пределы, то есть что

$$P\{|y_i(\tau_{n+1}) - y_n(\tau)| \leq E_g\},$$

где  $y(\tau_{n+1})$  — значение контролируемой функции в моменты времени  $\tau_{n+i} \in \tau > \tau^*$ ,  $y_n(\tau)$  — требуемое значение функции при интерполированном состоянии. Это вероятностный принцип прогнозирования.

Рассмотрим возможность прогнозирования ДУ с дожиганием восстановительного генераторного газа. Мы имеем здесь большое количество статистических данных значений параметров двигательной установки при различного рода неисправностях типа уменьшения КПД насоса, негерметичность и перекрытие различных магистралей. При этом все эти данные определены на промежутке времени  $\tau_0$ , достаточном для прогноза и срабатывания системы. Ввиду коррелированности процессов внутри ДУ задача решается в несколько этапов. Сначала составляется вектор признаков (вектор измерений) для каждого возможного отказа ДУ, который определяет причину отказа. Затем анализируется глубина измененных параметров, показывающая степень отказа.

Допустим, что мы сформировали вектор признаков. Здесь мы видим, что полученные статистические данные можно аппроксимировать в функциональные зависимости с помощью программы Microcal origin с достаточной степенью точности. То есть мы по данным  $y_j(\tau_0)$ ,  $y_j(\tau_1)$ , ...,  $y_j(\tau_n)$  создали  $F_j(\tau_i)$ . Здесь  $|F_j(\tau_i) - y_j(\tau_i)| \leq E_{gj}$ , где  $E_{gj}$  — максимально допустимый параметр разброса при интерполяции статистических данных  $j$ -го параметра,  $j$  — один из измеряемых  $m$  параметров вектора признаков,  $i$  — одно из значений  $j$ -го параметра.

Необходима аппроксимация функциональных зависимостей изменения того или иного параметра от времени (необходимо провести восстановление регрессионных моделей). В качестве примера был выбран параметр  $p_k$ , наиболее полно отражающий работу всего двигателя, — давление в камере сгорания при возникновении различных видов неисправностей: понижение КПД насоса — вариант 1 (рис. 1), перекрытие магистрали — 2 (рис. 2), возникновение негерметичности магистрали 3, (рис. 3). Анализ этих графиков показывает, что при понижении КПД изменение  $p_k$  лучше всего описывается полиномом II степени, но приемлема

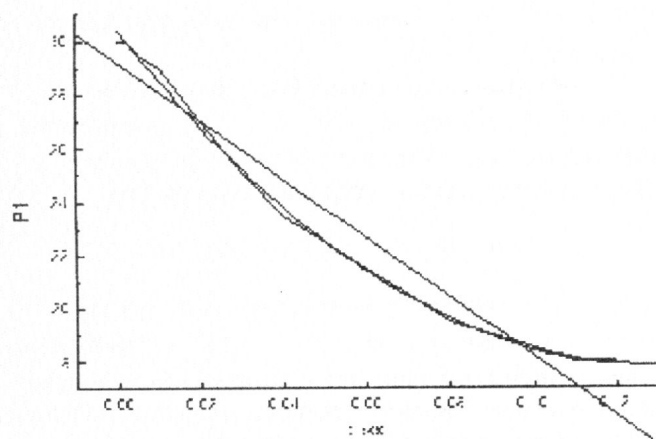


Рис. 1

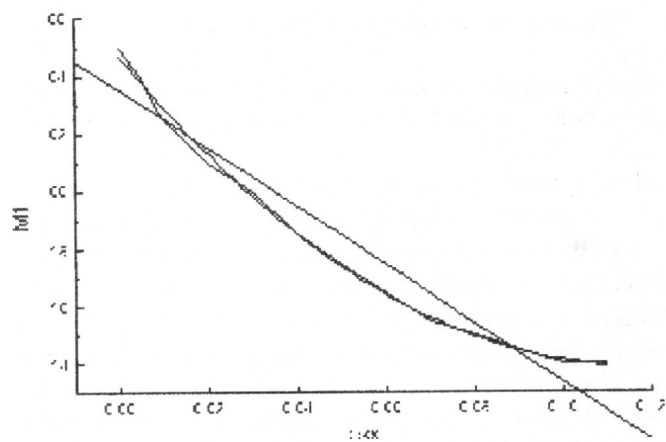


Рис. 4

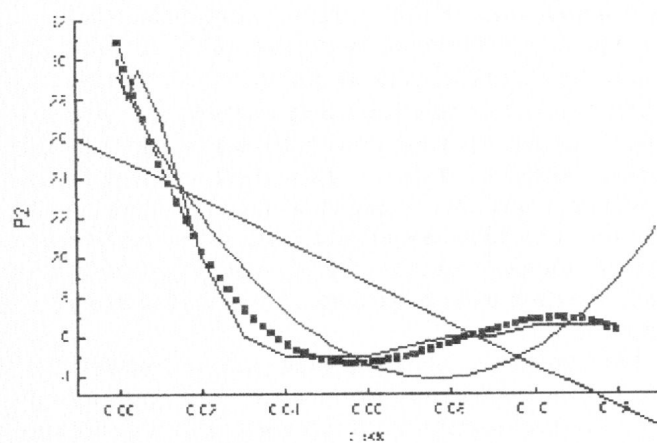


Рис. 2

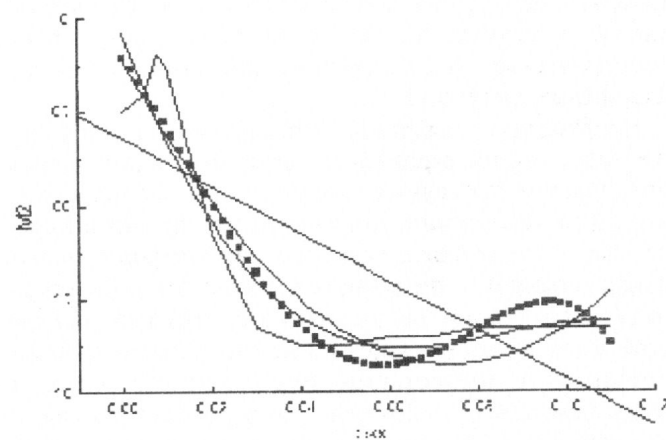


Рис. 5

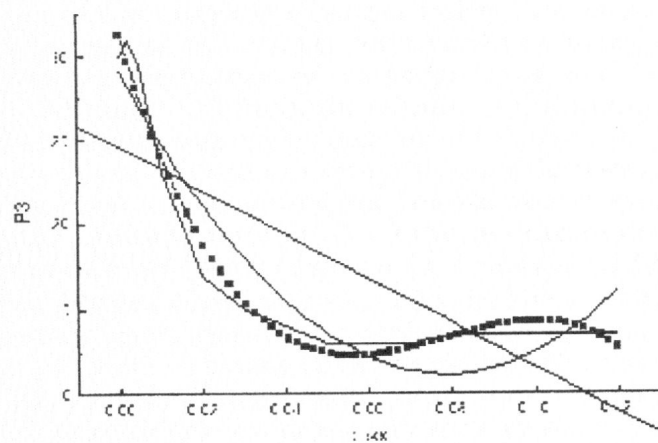


Рис. 3

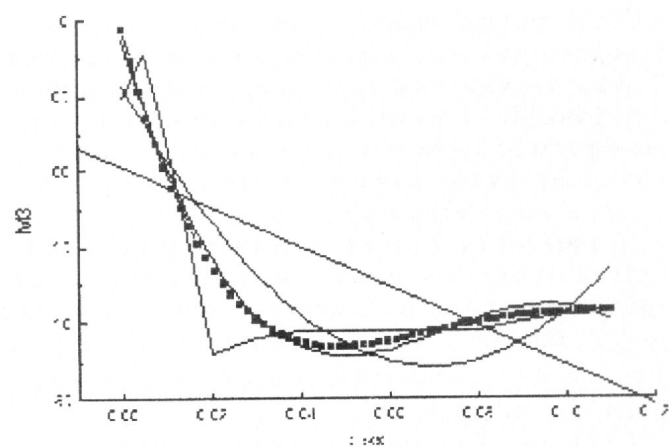


Рис. 6

также простая линеаризация. При перекрытии магистрали использование простой линеаризации совершенно неприемлемо. Наиболее близкой к реальной при перекрытии магистрали является аппроксимация с помощью полинома III степени. При негерметичности магистрали линеаризация неприемлема. Наилучшим вариантом является аппроксимация полиномом III степени вида  $F(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3$ . Однако значения весовых коэффициентов при перекрытии и негерметичности отличаются. Здесь рассматриваются случаи, приводящие к установлению одинакового режима работы после возникновения неисправности.

Сравнение же переходных процессов, протекающих при возникновении тех же неисправностей по параметру суммарного массового расхода горючего через насос (рис. 4—6), приводит к более существенному отличию друг от друга весовых коэффициентов в формулах аппроксимации, хотя вид уравнений практически соответствует виду изменения  $p_k$  при возникновении тех же неисправностей (полином II, III порядков). При рассмотрении неисправностей (перекрытие магистрали, негерметичность магистрали, снижение КПД насосов (ТНА)) имеем изменения  $P_k(t)$  и  $M_\Sigma(t)$ , показанные на рис. 1—6 и в таблице, из которых видим, что их можно интерполировать одним и тем же полиномом, но с разными весовыми коэффициентами и количественным составом членов полинома. Можно заключить, что в этом случае отказ прогнозируется при определении  $F_{\text{прогн}}(t)_{j=i,m}$  на промежутке экспозиции и выполняется условие  $|F_j(\tau_i) - F_{\text{прогн}}(\tau_i)| \leq E_{gi}$ , т. е. мы попадаем при этом в какой-либо допустимый диапазон допуска оценки того или иного состояния.

венному отличию друг от друга весовых коэффициентов в формулах аппроксимации, хотя вид уравнений практически соответствует виду изменения  $p_k$  при возникновении тех же неисправностей (полином II, III порядков). При рассмотрении неисправностей (перекрытие магистрали, негерметичность магистрали, снижение КПД насосов (ТНА)) имеем изменения  $P_k(t)$  и  $M_\Sigma(t)$ , показанные на рис. 1—6 и в таблице, из которых видим, что их можно интерполировать одним и тем же полиномом, но с разными весовыми коэффициентами и количественным составом членов полинома. Можно заключить, что в этом случае отказ прогнозируется при определении  $F_{\text{прогн}}(t)_{j=i,m}$  на промежутке экспозиции и выполняется условие  $|F_j(\tau_i) - F_{\text{прогн}}(\tau_i)| \leq E_{gi}$ , т. е. мы попадаем при этом в какой-либо допустимый диапазон допуска оценки того или иного состояния.

Значения коэффициентов аппроксимации в разных вариантах (рис. 1—6)

$A_0$ $\pm \sigma_0$	$A_1$ $\pm \sigma_1$	$A_2$ $\pm \sigma_2$	$A_3$ $\pm \sigma_3$	$A_4$ $\pm \sigma_4$	$R$	$R^2$	$SD$	$P$	$N$	Рис. №
129.19004 0.46151	-109.72123 7.0092				-0.97448		1.07991	8.1461E-10	15	1
130.40417 0.12113	-196.71375 5.39107	772.75083 46.06071			0.99897	0.99794	0.22729			
125.01019 1.74874	-105.02266 26.55929				-0.73894		4.092	0.00165	15	2
129.15475 1.06849	-401.98194 47.55459	2637.8766 406.30146			0.94837	0.8994	2.00495			
130.92130 0.71293	-698.23911 65.53251	9422.5306 1382.11862	-38549.950 7738.57942		0.98443	0.9691	1.16053			
124.53351 1.95721	-129.6094 29.72553				-0.77065		4.57983	0.00077	15	3
129.08451 1.27206	-455.69032 56.61489	2896.5630 483.71176			0.94772	0.89817	2.38694			
131.29887 0.7375	-827.04860 67.79131	11401.125 1429.75803	-48322.351 8005.31579		0.98812	0.97639	1.20053			
103.52589 0.41584	-101.57878 6.91087				-0.97333		0.93583	4.9015E-9	14	4
104.67046 0.12649	-186.41470 6.1456	810.24757 56.59545			0.99866	0.99732	0.2206			
103.57029 1.84679	-128.50532 30.69199				-0.77048		4.15612	0.00126	14	5
107.81841 1.44527	-443.37813 70.21871	3007.2747 646.65149			0.92898	0.863	2.5205			
109.24589 1.67131	-665.17619 162.81554	8377.0721 3648.8837	-32801.505 21972.16899		0.94232	0.88797	2.39053			
107.84176 1.87418	-309.50298 294.55795	-7374.4460 11621.74428	194932.24 161693.59095	-1034247.3 728147.81955	0.95314	0.90848	2.27747			
100.20589 2.47119	-130.28588 41.06884				-0.67537	5.56129	0.00803			6
105.66871 2.07415	-535.19306 100.77286	3867.1715 928.02787			0.8883	0.78908	3.61725			
108.68622 2.06238	-1004.0470 200.91314	15218.266 4502.69478	-69338.369 27113.48975		0.93407	0.87248	2.9499			
109.42712 2.51564	-1191.7221 395.37399	23529.736 15599.42773	-189504.70 217035.19073	545732.50 977365.27445	0.93635	0.87675	3.05697			



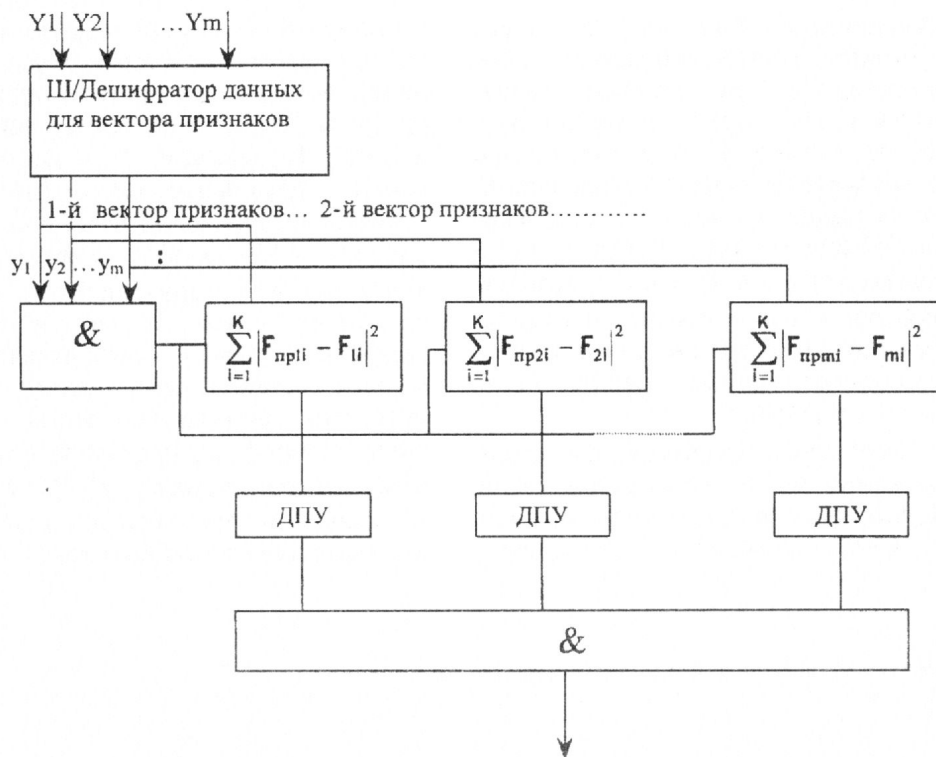


Рис. 7. Решение о наличии неисправности, соответствующей первому вектору признаков

Необходимость векторной оценки исходит из коррелированности процессов внутри ДУ. Следовательно, при этом требуется наличие измерений нескольких параметров.

Здесь следует отметить, что правильно составленный вектор признаков позволяет локализовать неисправность в течение времени экспозиции, а значит позволяет принять грамотное решение. Рассмотрим создание одного из векторов признаков при одновременном определении типа неисправности и ее локализации.

$$F(\tau) = [P_k, G_{m\Sigma}, P_{zz}, G_{ок}, g_0, K_{гг}, N, \dots]^T.$$

Если в начале  $\tau_0$  расход окислителя через газовый генератор  $m_0''$  уменьшается, следовательно коэффициент соотношения компонентов  $K_{гг}$  уменьшается при первоначально неизменных остальных параметрах, то при этом неисправность локализована в магистрали окислителя газогенератора ЖРД после точки отбора на газогенератор. При ее развитии произойдет следующее: уменьшающаяся температура газа приведет к падению давления в газогенераторе и уменьшению степени расширения газа на турбине.

Если в начале  $\tau_0$   $m_0''$  не падает, а давление  $P_k$  уменьшается, то неисправность локализована в магистрали окислителя камеры сгорания ЖРД после точки отбора на газогенератор. При этом уменьшается  $P_k$ , следовательно увеличивается перепад давления на турбине и идет форсирование ТНА, что может привести к прогару ротора турбины и его разрушению.

Если в начале  $\tau_0$   $m_0''$  уменьшается,  $P_k$  уменьшается одновременно и идет дросселирование режима ТНА, то неисправность локализована в магистрали окислителя до точки отбора на газогенератор. Остальные неисправности можно проанализировать подобным образом. На основании этого сформируем структурную схему обработки информации.

Принцип действия схемы: измеряемые параметры в реальном масштабе времени поступают на шифратор/дешифратор данных для вектора признаков — Ш/Дш, который формирует соответствующие векторы для распознавания неисправностей. Попадание в допустимый допуск нужной интерполяции оценивается путем дисперсионного разброса приходящего параметра (вернее, прогнозируемой функции на основе нескольких его значений от параметра в базе данных по методу наименьших

квадратов). Множители & обеспечивают возможность дальнейшего прохода информации.

При непревышении каждым из слагаемых некоторого порогового числа дается ответ о  $\sum_{i=1}^K |F_{pr1i} - F_{1i}|^2, \sum_{i=1}^K |F_{pr2i} - F_{2i}|^2, \dots, \sum_{i=1}^K |F_{prmi} - F_{mi}|^2$  наличию именно этого типа неисправности.

Таким образом, предложен метод оценки работоспособности ЖРД путем создания векторов признаков аварийных ситуаций, используя статистический материал результатов стендовых, летных испытаний и результатов расчетов протекания переходных процессов, возникающих при появлении той или иной неисправности и сравнение их с векторами банка данных.

1. Луарсарбов К. А., Пронь Л. В., Сердюк А. В. Летные испытания ЖРД. — М., 1997.

2. Махин В. А., Миленко Н. П., Пронь Л. В. Теоретические основы экспериментальной обработки ЖРД. — М., 1973.
3. Фу К. Последовательные методы в распознавании образов и обучения машин. — М., 1971.
4. Гнедов Г. М., Росенбаум О. Б., Шумов Ю. А. Проектирование систем контроля ракет. — М., 1975.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М., 1974.
6. Волков Е. Б., Судаков Р. С., Сырицын Т. А. Основы теории надежности ракетных двигателей. — М., 1974.

#### REASONS DETERMINATION OF LIQUID ROCKET ENGINE DAMAGE SITUATIONS USING ENGINE EXPERIMENT DATA

L. V. Pron', S. A. Samokhvalov

An attempt of the statistical determination of disrepair type on the basis of the disrepair localization using a vector of the special selected parameters has been done. this disrepair resulted from the damage situation.

УДК 62.092

### РАСЧЕТ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ С ФОКЛИНОВЫМ КОНЦЕНТРАТОРОМ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ФОКЛИНОВОГО ТИПА

© Г. Н. Пряхин, А. Я. Павлык, А. Г. Филатов

Науково-дослідний інститут енергетики Дніпропетровського національного університету

Розрахунок сонячної батареї з фокліновим концентратором містить у собі розрахунок концентратора на основі оптимального сполучення заданої ширини площини фотоелектричної панелі батареї прогнозованого коефіцієнта концентрації фоклінового концентратора і числа відбить сонячних променів від граней концентратора. Розраховується загальна площа фотоелектричної панелі і на основі її ширини визначається довжина панелі і відповідна довжина фоклінового концентратора, а також розраховується кількість фотоелектричних перетворювачів ФЕП у батареї.

В настоящее время внимание научной общественности направлено на использование энергии космоса. Одним из вариантов использования космической энергии является фотоэлектрический способ получения электрической энергии. Это единственный способ, который непосредственно преобразует солнечное излучение, являющееся практически неисчерпаемым источником энергии, в электрическую энергию. Реализуется фотоэлектрический способ получения электрической энергии через посредство фотоэлектрических станций (ФЭС) различных типов, в частности с фоклиновым концентратором (рис. 1).

Применение концентраторов солнечной энергии позволяет не только поднять энергетическую эффективность ФЭС, но и улучшить их энергоэкономические и эксплуатационные показатели.

В институте энергетики Днепропетровского национального университета был произведен расчет солнечной батареи с фоклиновым концентратором, входящим в состав ФЭС, и получены практические результаты.

Расчет позволяет определить геометрию и массогабаритные показатели фоклинового концентратора на основе размеров фотоэлектрической панели и ее положения относительно направления потока сол-